

Optical and thermal modeling of parabolic trough concentrator systems

Doctoral Thesis

Author(s):

Wirz, Men

Publication date:

2014

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010120400>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS. ETH NO. 21800

OPTICAL AND THERMAL MODELING OF PARABOLIC TROUGH CONCENTRATOR SYSTEMS

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

MEN WIRZ

MSc ETH ME

born April 13, 1984

citizen of Bern (BE)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Aldo Steinfeld, examiner
Prof. Dr. Eduardo Zarza, co-examiner
Dr. Andreas Haselbacher, co-examiner

2014

Abstract

To study the behavior of a solar parabolic trough concentrator (PTC) and to optimize its overall performance, a detailed model of the system is required. For this purpose, a 3D heat transfer model for PTC systems is developed in this thesis, and several studies in which the model is implemented are presented. Monte Carlo ray tracing, coupled to a finite volume solver, is used to model radiation, convection, and conduction heat transfer between all relevant surfaces of the receiver of the PTC. The non-uniform distribution of the incident solar radiation, the radiative exchange between the receiver surfaces, and the heat gain/loss around the receiver's circumference and along the system's axis are determined for spectral radiative properties of the receiver and concentrator surfaces. Comparing simulation results with experimental data from both on-sun and off-sun test setups indicates that the model accurately predicts heat transfer in PTC systems.

To estimate the expected energy yield of a solar field, the system performance is ideally determined at a single design point. To find such design points, thermal efficiencies of two PTC systems are evaluated with the detailed heat transfer model for a variety of operating conditions and geographical locations. By comparing results with yearly average efficiencies, it is shown that the most common choices of operating conditions at which solar field performance is evaluated are inadequate for predicting the yearly average efficiency, either significantly over- or under-predicting it by as much as 11.5%. An alternative simple method is presented of determining representative operating conditions for solar fields through weighted averages of the incident solar radiation. With this procedure, it is possible to accurately predict year-round performance of PTC systems within 0.3%, reduce the computational effort, and provide suitable operating conditions for the optimization process.

In the framework of a research project, a novel PTC receiver is developed that increases the system efficiency and reduces costs. A full optical and thermal analysis of improved selective coatings for this receiver is performed with the heat transfer model. The analysis shows that the best coating leads to higher efficiencies than existing coatings and confirms the potential of the novel coating material to be used for the new receiver concept. An off-sun test setup is proposed to heat the receiver to determine the temperature-dependent heat losses and to assess the performance of an innovative active vacuum system that is used to control pressure levels in the receiver. The expected behavior of the test setup is evaluated with the heat transfer model, and the predicted performance values are used to assess the specifications of the setup. Off-sun tests with a preliminary selective coating proved the feasibility of the testing process, and simulation results using the heat transfer model and spectral data agree well with experimental results.

To further increase the efficiency of PTC systems, the detailed heat transfer model is used to analyze the improvement potential of a typical PTC system with step-wise idealizations of system components. Sigmoid functions are used to idealize and optimize the optical behavior of the selective coating. Reflectance, absorptance, and transmittance behavior is evaluated for the glass envelope, assessing the potential performance of a system with an ideal selective glass. Optical properties of the primary concentrator mirror, such as reflectivity as well as tracking and surface errors, are successively idealized to reveal the differences between ideal and real concentrators. The effect of the supporting structure is also analyzed by reducing the number of heat collection elements (HCE) per mirror module, lowering the shaded area between HCEs, and removing the structure altogether. In a second step, several secondary mirror designs are evaluated and optimized, including a partially reflective glass surface, insulation in the vacuum annulus with reflective surfaces, as well as aplanatic mirror and tailored secondary designs. Idealizing components leads to increases in thermal efficiency between 4.3% and 7.3%, while the secondary designs enable efficiency increases of up to 1.6%.

Zusammenfassung

Detaillierte Modelle sind notwendig um das Verhalten von solaren Parabolrinnenkonzentratoren (PTC) zu beschreiben. In dieser Dissertation wird ein 3D-Wärmeübergangsmodell für PTCs entwickelt und im Rahmen diverser Fallstudien angewendet, welche hier präsentiert werden. Die Verfahren der Monte-Carlo-Strahlverfolgung und der Finite-Volumen werden benutzt um den Wärmeaustausch durch Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeleitung zwischen den Oberflächen des PTC-Receiver zu modellieren. Das Modell berechnet die ungleichmässige Temperatur- und Sonneneinstrahlungsverteilung, den Austausch von Wärmestrahlung zwischen den verschiedenen Oberflächen, sowie die Wärmegewinne und -verluste entlang des Receiver-Umfangs und der Systemachse mittels spektraler Strahlungsdaten für die Receiver- und Konzentrator-Oberflächen. Vergleiche von Simulationswerten mit experimentellen Daten von PTC-Prüfständen belegen, dass das Modell eine exakte Analyse des Wärmeaustauschs in PTC-Systemen ermöglicht.

Eine exakte Abschätzung des erwarteten jährlichen Energieertrags eines Solarfeldes erfolgt idealerweise an einem einzigen Betriebspunkt. Um geeignete Betriebspunkte zu finden werden mit dem Wärmeübergangsmodell die Wirkungsgrade von zwei PTC-Systemen berechnet. Verwendet werden dabei die Daten von verschiedenen Betriebsbedingungen und geographischen Positionen. Es zeigt sich, dass übliche Betriebspunkte nicht geeignet sind für eine exakte Berechnung des Ertrags des Solarfeldes, da der jährliche Wirkungsgrad bis zu 11.5% über- oder unterschätzt werden. Ein einfaches Verfahren wird als Alternative vorgeschlagen bei dem gewichtete Mittelwerte der einfallenden Sonnenstrahlung verwendet werden um einen repräsentativen Betriebspunkt zu ermitteln. Dieses Verfahren ermöglicht eine exakte Abschätzung des jährlichen Ertrags von PTC-Systemen innerhalb von 0.3%, reduziert den Rechenaufwand und schafft einen Betriebspunkt für Optimierungsstudien.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wird ein neuartiger PTC-Receiver entwickelt der erhöhte Wirkungsgrade und tiefere Kosten ermöglicht. Das Wärmeübergangsmodell wird benutzt um eine optische und thermische Analyse von verbesserten selektiven Beschichtungen für diesen Receiver durchzuführen. Die Studie zeigt auf, dass höhere Wirkungsgrade möglich sind mit diesen neuartigen Beschichtungsmaterialien und sie bestätigt das Potential für die Anwendung im neuen Receiver. Ein Laborprüfstand für PTC-Receiver wird entwickelt um die temperaturabhängigen Wärmeverluste zu bestimmen und das Verhalten eines innovativen Vakuumsystems zu ermitteln, mit dem der Druck im Innern des Receivers geregelt wird. Das Wärmeübergangsmodell wird dabei benutzt um das Verhalten des Prototyps voraussagen und die benötigten Spezifikationen des Prüfstands festzulegen. Tests mit einer ersten Serie einer selektiven Beschichtung belegen die Machbarkeit des Prüfverfahrens. Simulationsergebnisse generiert mit dem Modell unter Verwendung von Spektraldaten stimmen mit den experimentellen Daten überein.

Um die Effizienz von PTC-Systemen weiter zu erhöhen wird das Wärmeübergangsmodell benutzt um das Verbesserungspotential eines typischen PTC durch die schrittweise Idealisierung von Systemkomponenten zu untersuchen. Sigmoidfunktionen werden benutzt um die optischen Eigenschaften der selektiven Beschichtung zu idealisieren und zu optimieren. Die optischen Eigenschaften der Glashülle und des Konzentratorspiegels werden ebenfalls nacheinander idealisiert um den Effekt eines idealen Verhaltens zu ermitteln. Der Einfluss der Tragkonstruktion wird berechnet, indem der Schattenwurf reduziert wird und die Anzahl Stützarme verringert wird. In einem weiteren Schritt wird der Einsatz von Sekundäroptik am Receiver evaluiert und optimiert. Die analysierten Designs beinhalten reflektive Glasbeschichtungen, reflektierendes Isolierungsmaterial im Innern des Receivers, sowie aplanatische Spiegel und sogenannte Tailored Secondaries. Wirkungsgradzunahmen von bis zu 7% für idealisierte Komponenten und 1.6% für Sekundärspiegel werden erreicht.